

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ХОЛОДНИХ ЕМУЛЬСІЙНО-МІНЕРАЛЬНИХ СУМІШЕЙ

OVERVIEW OF TECHNOLOGIES FOR OBTAINING COLD EMULSION-MINERAL MIXTURES



Головченко Василь Сергійович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету. E-mail: vasiagolovchenko05@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5078-8682>

Анотація. Використання холодної емульсійно-мінеральної суміші (ХЕМС) замість гарячої асфальтобетонної суміші дає кілька переваг. Переваги включають збереження матеріалів і зменшення споживання енергії, збереження навколишнього середовища та зниження витрат. Холодна суміш, отримана шляхом змішування мінерального заповнювача з бітумною емульсією. Незважаючи на зусилля, докладені протягом останніх кількох десятиліть для вдосконалення та розвитку ХЕМС, залишаються певні недоліки, які роблять його нижчим за гарячої АБС, що призводить до обмеження або мінімізації використання. Проте розробка ХЕМС для будівництва, реконструкції та обслуговування доріг постійно набуває інтересу як у промисловому, так і в дослідницькому секторах будівництва доріг.

Дослідники в сфері будівництва доріг постійно шукають способи знизити споживання енергії, викиди парникових газів і підвищити вартість ефективність. Холодна емульсійно-мінеральна суміш є результатом досліджень у цьому напрямку протягом останніх кількох десятиліть. ХЕМС це суміш отримана шляхом змішування бітумної емульсії, заповнювачів і наповнювача при температурі навколишнього середовища. Використовуючи ХЕМС, можна досягти 95% економії енергії порівняно з виробництвом гарячої АБС. Недоліки холодної суміші також очевидні. Оскільки вода має випаровуватися з бітумної емульсії, щоб бітум мав адгезію із заповнювачами холодної суміші може знадобитися кілька тижнів, щоб досягти своєї повної міцності. Це може призвести до нижчої початкової міцності та високої пористості порівняно зі звичайним гарячим асфальтовим розчином. Крім того, через воду в суміші потенційне пошкодження вологою та довговічність викликають занепокоєння. Як наслідок, ХЕМС рідко використовували як конструкційний шар покриття.

Ключові слова: холодна емульсійно-мінеральна суміш, гаряча асфальтобетонна суміш, емульсійно-мінеральна суміш.

Вступ

Гаряча асфальтобетонна суміш, яка складається з дрібних і крупних мінеральних заповнювачів і наповнювачів та бітуму, широко використовується як основний будівельний матеріал для будівництва автомобільних доріг. Відомо, що асфальтобетонні дороги користуються популярністю по всьому світу. У Швейцарії національна мережа автомобільних доріг складається з 86 % асфальтобетонних покриттів, 9 % бетонних покриттів і 5 % композитних покриттів, які складаються з асфальтобетонного шару, влаштованого на бетонний шар дорожнього одягу [1]. У Великобританії близько 95 % доріг влаштовані асфальтобетоном [2]. У США це число становить 96 % асфальтобетонних доріг [3].

Гарячу АБС зазвичай виробляють шляхом змішування попередньо нагрітих мінеральних заповнювачів, наповнювачів та бітумного в'язучого. Оскільки робоча температура є відносно високою, для нагрівання заповнювачів і бітуму потрібна велика кількість палива. Дослідження показує, що приблизно 7,6-9,7 літрів палива потрібно спалити для виробництва 1 тонни гарячої АБС [4-6], споживаючи 270 МДж [7,8] енергії і вносячи 15 % [6] у загальну вартість виробництва гарячої АБС. Починаючи з нафтової кризи в 1970-х роках і після Кіотського протоколу в 1997 році, дослідники приділяли більше уваги споживанню енергії, викидам CO₂ і екологічності асфальтобетону через шкоду навколишньому середовищу. Асфальтобетонна суміш з низьким рівнем викидів (тепла АБС) привернула значну увагу через низький вплив на навколишнє середовище та економічну ефективність [9]. Зокрема, тепла асфальтобетонна суміш, яка виробляється при температурі від 20 °С до 55 °С нижче ніж гаряча АБС, вважалася перспективною заміною [5]. Проте, паливо, збережене за допомогою теплої АБС, зазвичай знаходиться в діапазоні 20 - 35 %, що все ще недостатньо [5].

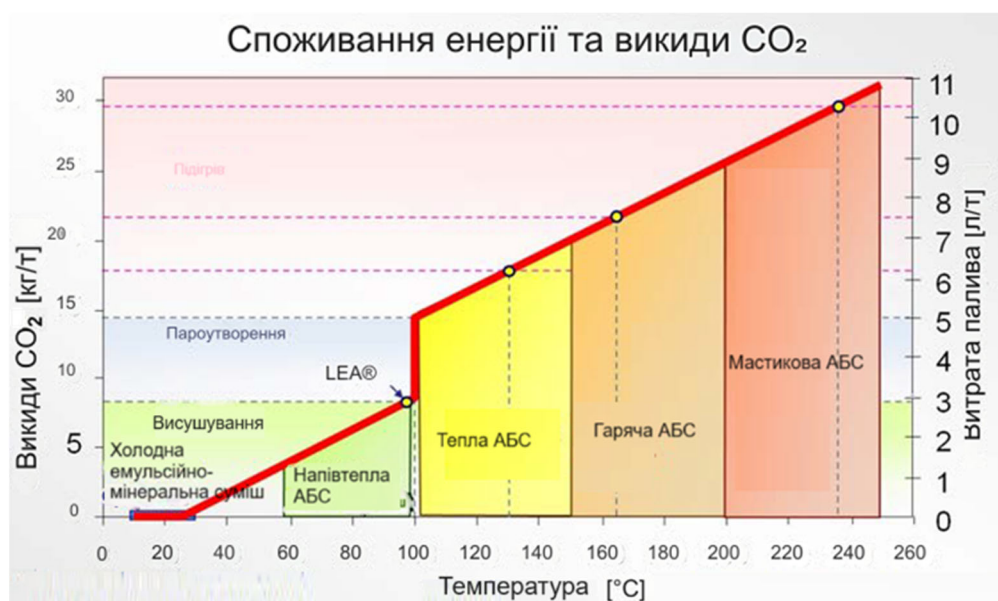
Використовуючи холодну суміш, можна заощадити понад 95% енергії, необхідної під час виробництва гарячої АБС, див. рис. 1. Недоліки холодної асфальтобетонної суміші також очевидні. Оскільки вода повинна випаровуватися з бітумної емульсії для розвитку адгезії бітуму до заповнювачів, холодному асфальтобетону потрібно багато часу (зазвичай кілька тижнів), щоб досягти своєї повної міцності [10]. Це може призвести до неадекватних характеристик (нижчої початкової міцності та високої пористості) порівняно зі звичайним гарячим асфальтобетонним розчином. Крім того, через присутність води в суміші, потенціал пошкодження вологою та довговічність викликають занепокоєння [11,12]. Як наслідок, холодна асфальтобетонна суміш рідко використовується для дорожнього покриття. [13,14].

Основна частина

Виробництво холодних емульсійно-мінеральних сумішей

Найважливішим параметром для виробництва гомогенних сумішей холодних емульсійно-мінеральних є стабільність змішування бітумної емульсії. За даними вченого Salomon [15], у більшості випадків використовуються бітумні емульсії середнього та повільного розпаду, тоді як бітумні емульсії швидкого розпаду не рекомендуються. Це пояснюється тим, що бітумна емульсія, яка швидко застигає, флокулює та швидко коалесцує в присутності дрібних заповнювачів і наповнювача з відносно високою питомою поверхнею, викликаючи утворення кульок бітуму та недостатнє покриття заповнювачів [16]. Хоча деякі дослідники стверджували, що позитивно заряджена катіонна емульсія може створювати сильніший адгезійний зв'язок із негативно зарядженими заповнювачами, що містять велику кількість оксиду кремнію. (SiO₂). [17,18], це не було підтверджено експериментально. Основне занепокоєння

при використанні катіонної емульсії полягає в тому, що рН суміші може швидко підвищуватися, навіть досягаючи значення близько 13. Додавання цементу нейтралізує кислоти в катіонних емульсіях, викликаючи дестабілізацію емульсії [15]. З іншого боку, основною проблемою при використанні аніонної емульсії є вплив багатовалентних іонів, особливо Ca^{2+} , які вивільняються цементом при контакті з водою. Нещодавно було підтверджено, що іони Ca^{2+} реагують з аніонними емульгаторами та дестабілізують бітумну емульсію [19]. Відповідний вибір бітумної емульсії повинен гарантувати, що емульсія може зберігати свою стабільність перед ущільненням. З цією метою настійно рекомендується провести тест на стабільність змішування. Однак стандартизованого тесту на стабільність змішування в присутності цементу не існує.



Примітка: Враховані тільки прямі викиди CO₂, тобто не враховано викиди від виробництва бітуму, мінеральних матеріалів та електроенергії (наприклад для гарячої АБС додаткові 22 кг/т)

Рисунок 1 – Споживання енергії та викиди CO₂ [13,14]

Figure 1 – Energy consumption and CO₂ emissions [13,1]

Вибір заповнювачів, наповнювачів та цементу

Загально визнано, що ХЕМС не вимагає будь-якого конкретного типу заповнювачів. Загалом, заповнювачі та наповнювачі придатні для гарячих АБС, також підходять для холодних емульсійно-мінеральних сумішей. Подрібнені вапнякові заповнювачі вважаються найбільш прийнятними, оскільки їхня пориста текстура може поглинати воду з емульсії, що сприяє розвитку міцності [15]. У більшості випадків використовується щільний тип зернового складу, тоді як у деяких випадках використовується пористий тип зернового складу. Можливе використання добавки портландцементу в ХЕМС, оскільки це загальноживаний цемент у всьому світі. Крім того, було досліджено використання цементів швидкого твердіння, і було встановлено, що початкова міцність суміші ХЕМС може бути значно збільшена [20]. Тому цемент швидкого твердіння, такі як сульфоалюмінатний і кальцієво-алюмінатний цемент, можуть зв'язувати більше води та зменшувати викиди CO₂ порівняно з портландцементом [20].

Вміст бітумної емульсії та цементу

Методи проектування суміші, які використовуються для гарячої АБС, також застосовуються до ХЕМС. Залежно від зернового складу, гаряча АБС зазвичай містить 4 – 6 % бітуму від маси сухого мінерального матеріалу. Після визначення потрібного вмісту бітуму можна розрахувати вміст бітумної емульсії. Бітумні емульсії, виготовлені для ХЕМС, зазвичай містять 60 % бітуму. Наприклад, якщо потрібно 6 % бітуму, потрібно додати 10 % бітумної емульсії. За потреби для виробництва ХЕМС додавати орієнтовно 1 - 2 % портландцементу. Цемент також збільшує крихкість ХЕМС, вартість та викиди CO₂. Виконані дослідження показали, що додавання 2 % цементу призводить до еквівалентної міцності з гарячою АБС після орієнтовно 2 місяців твердіння [21]. З точки зору навколишнього середовища, додавання 2 % портландцементу призведе до таких же викидів CO₂, як гаряча АБС.

Процедури змішування та умови набрання міцності

Оскільки ХЕМС можна виробляти при температурі навколишнього середовища, його легше та безпечніше використовувати, ніж гарячі АБС. У лабораторії сировину додають у змішувач і змішують у такому порядку: спочатку заповнювач, наповнювач потім бітумна емульсія, і за потреби цемент. Рекомендується додавання додаткової води. Метою додавання додаткової води є змащування мінеральних матеріалів. Умови затвердіння є ключовим фактором розвитку міцності в ранньому віці. У лабораторії температуру і відносну вологість потрібно контролювати. Рекомендується нижча відносна вологість, оскільки це прискорює випаровування води та збільшення міцності ХЕМС. На будівельному майданчику тепла, суха та сонячна погода є кращою для влаштованих шарів дорожнього одягу з ХЕМС через високу швидкість випаровування. На ранніх стадіях будівництва слід уникати дощу.

Емульсійно-мінеральні суміші – суміші, отримані змішуванням у мобільних або стаціонарних змішувальних установках без сушіння та підігріву мінеральної частини та емульсії бітумної дорожньої.

Емульсійно-мінеральні суміші поділяються на:

- Емульсійно-мінеральні суміші, призначені для влаштування шарів дорожнього одягу, серед них виділяють:
 - холодні емульсійно-мінеральні суміші з мінеральною частиною на основі необроблених органічним в'язучим природних та/або штучних мінеральних матеріалів;
 - суміші з мінеральною частиною на основі матеріалу після фрезування з/або без додавання необроблених органічним в'язким природних та/або штучних мінеральних матеріалів (матеріал, що отримується за технологією холодного ресайклінгу);
- литі емульсійно-мінеральні суміші, призначені для влаштування захисних шарів, шарів зносу;
- суміші, які призначені для виконання ремонтних робіт.

На рисунках 2 - 8 показано відомі схеми приготування емульсійно-мінеральних сумішей [22], призначених для влаштування шарів дорожнього одягу.

1. Комплексна схема (рис. 2): всі компоненти емульсійно-мінеральної суміші перемішуються в одному змішувачі до отримання однорідної та якісної суміші.

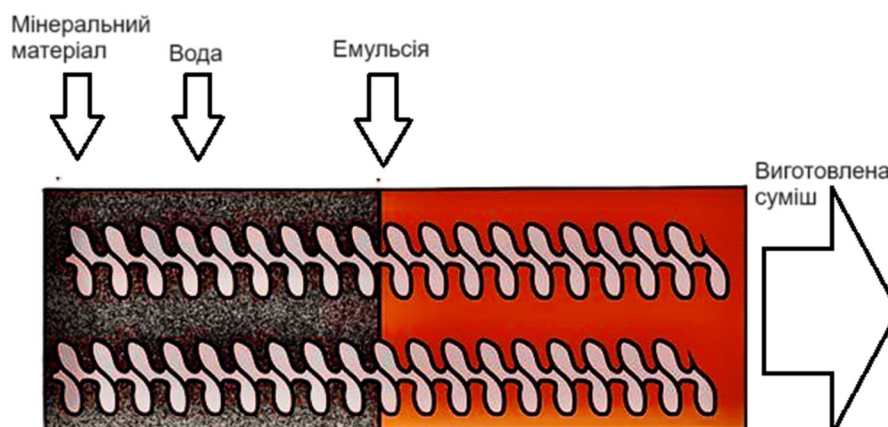


Рисунок 2 – Комплексна схема
Figure 2 – Comprehensive scheme

2. Роздільна схема:

- попередня обробка заповнювача в'язучим (рис. 3) дрібна фракція (0/d) обробляється органічним в'язучим, а саме емульсією або гарячим бітумом і далі зберігається в штабелі. Заключне перемішування відбувається в холодному змішувачі, причому заповнювач вводиться в центральну частину мішалки після об'єднання крупної фракції (d/D) з емульсією;

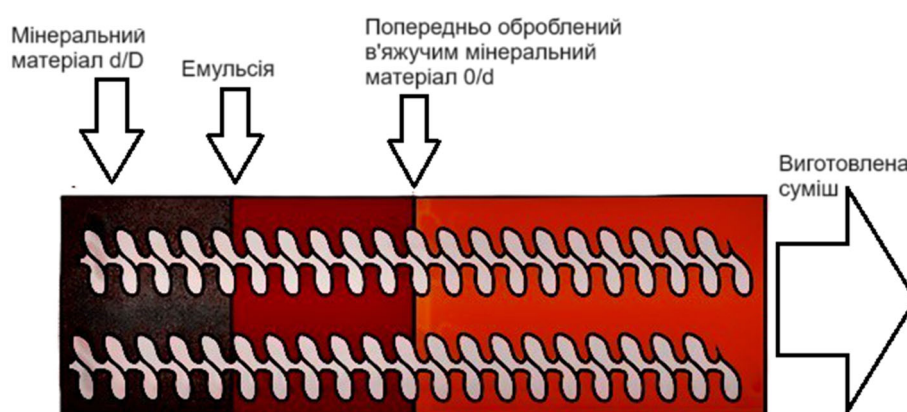


Рисунок 3 – Роздільна схема, попередня обробка заповнювача (0/d) в'язучим
Figure 3 – Separate scheme, preliminary treatment of the aggregate (0/d) with a binder

- попередня обробка заповнювача в'язучим (рис. 4): крупна фракція (d/D) обробляється органічним в'язучим і далі зберігається у штабелі. Заключне перемішування відбувається у холодному змішувачі за комплексною схемою.

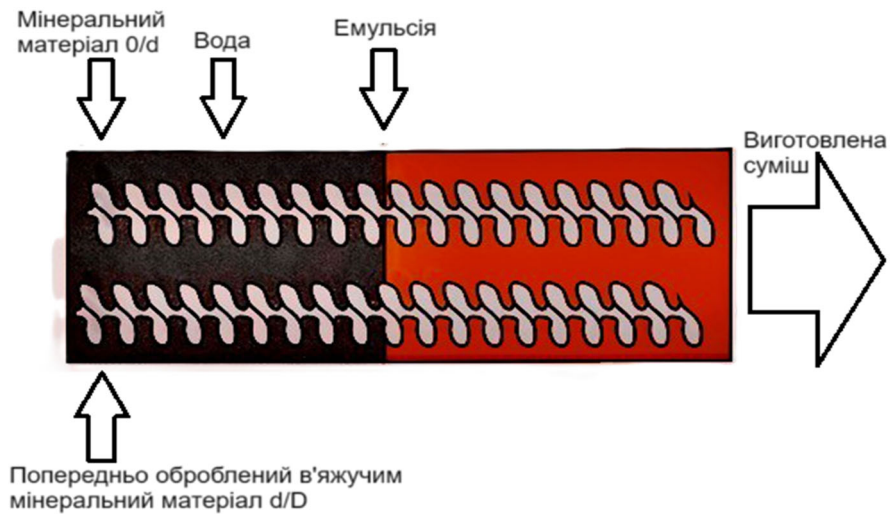


Рисунок 4 – Роздільна схема, попередня обробка заповнювача (d/D) в'язучим
Figure 4 – Separate scheme, preliminary treatment of the aggregate (d/D) with a binder

- попередня обробка заповнювача хімічним реагентом (рис. 5 - 6): дрібна фракція (0/d) обробляється хімічним реагентом і зберігається в штабелі, або за наявності другого змішувача після обробки відразу подається для остаточного перемішування за комплексною схемою або в центральну частину мішалки.

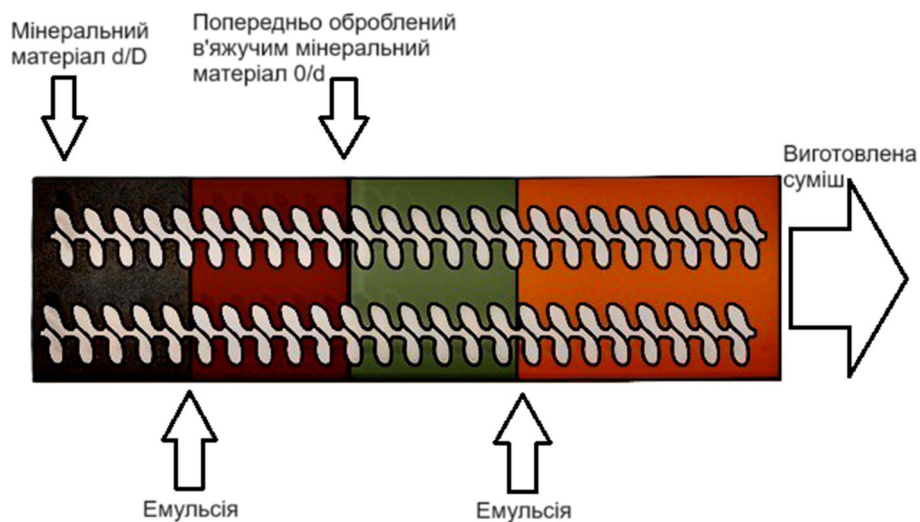


Рисунок 5 – Роздільна схема, попередня обробка заповнювача (0/d) хімічним реагентом
Figure 5 – Separate scheme, preliminary treatment of the aggregate (0/d) with a chemical reagent

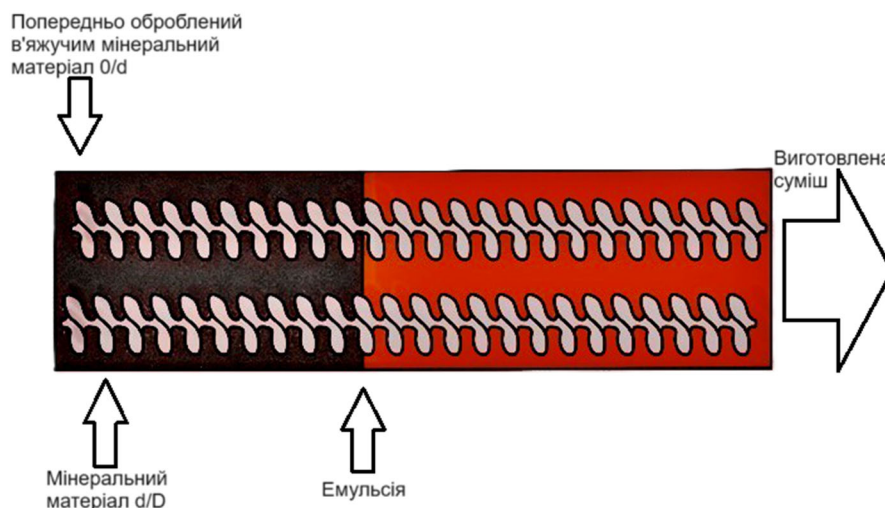


Рисунок 6 – Роздільна схема, попередня обробка заповнювача (0/d) хімічним реагентом
Figure 6 – Separate scheme, preliminary treatment of the aggregate (0/d) with a chemical reagent

- роздільна попередня обробка крупного заповнювача (d/D) та дрібного заповнювача (0/d) (рис. 7): фракції окремо обробляються в'язучим і далі зберігаються у штабелях. Остаточне перемішування відбувається у холодному змішувачі за комплексною схемою.

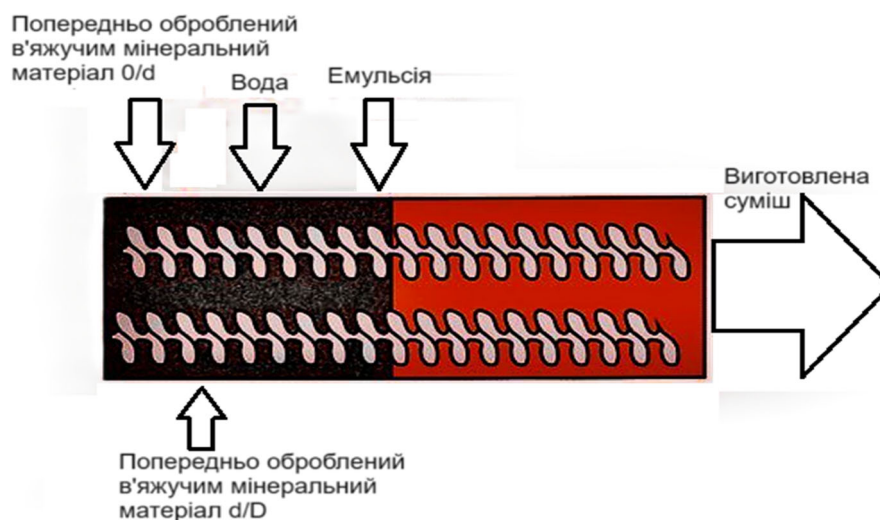


Рисунок 7 – Роздільна схема: роздільна попередня обробка крупного та дрібного заповнювача в'язучим

Figure 7 – Separate scheme: separate preliminary treatment of coarse and fine aggregate with a binder

3. Послідовна схема (рис. 8): крупна фракція (d/D) обробляється в'язучим у передній частині мішалки, дрібна фракція ($0/d$) подається в задню частину мішалки, де перемішується з емульсією та при необхідності з добавками.

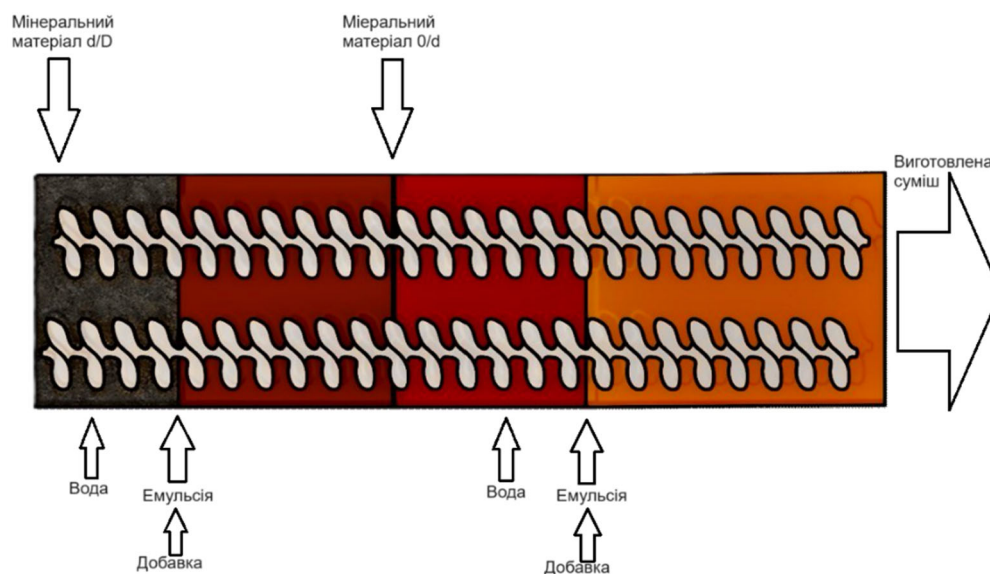


Рисунок 8 – Послідовна схема
Figure 8 – Sequential scheme

Як видно з вищевикладеного, процес виготовлення всіх емульсійно-мінеральних сумішей поєднує те, що останньою технологічною операцією є змішання мінеральної частини з бітумною емульсією, що і визначає ряд особливостей.

До особливостей емульсійно-мінеральних сумішей належать:

- наявність води на всіх фазах існування;
- іонне середовище;
- фізична та хімічна взаємодія між бітумною емульсією та мінеральними матеріалами;
- у початковій фазі існування суміші в'язуча речовина знаходиться у формі з'єднаних сферичних частинок бітуму;
- природа дорожнього моноліту, що змінюється, з емульсійно-мінеральною сумішшю.

У гарячих сумішах взаємодія між мінеральним матеріалом та бітумом є головним чином фізичною. В емульсійно-мінеральних сумішах в'язуче не тільки активно фізичне, а й хімічне, оскільки воно іонізоване складовими водної фази. Між мінеральним матеріалом та емульсією відбувається низка реакцій. На (рис. 9) зображено процес взаємодії емульсії з різними мінеральними матеріалами [23].

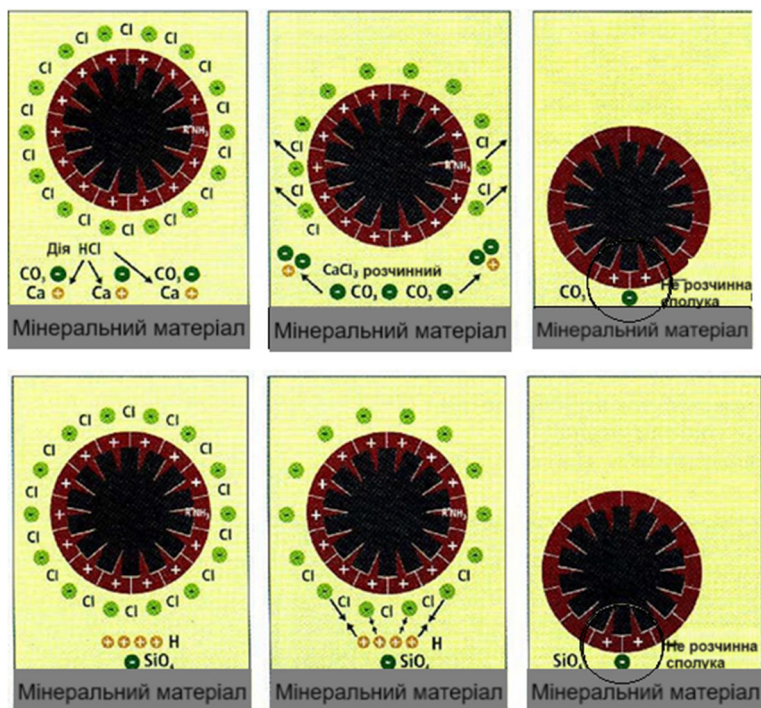


Рисунок 9 – Розпад катіонної бітумної емульсії
Figure 9 – Breakdown of cationic bitumen emulsion

Висновок

Холодна емульсійно-мінеральна суміш це суміш отримана шляхом змішування бітумної емульсії, заповнювачів і наповнювача в мобільних або стаціонарним установках при температурі навколишнього середовища.

Холодна емульсійно-мінеральна суміш є перспективним матеріалом, застосування якого може зменшити споживання енергії, викиди парникових газів і підвищити економічну ефективність.

Було проаналізовано закордонний досвід отримання холодних емульсійно-мінеральних сумішей, а саме особливості їх виробництва, вибір заповнювачів, наповнювачів та цементу, вміст бітумної емульсії, процедури змішування та набрання міцності, дану суміш можливо застосовувати для автомобільних доріг з низькою інтенсивністю руху.

Використання холодних емульсійно-мінеральних сумішей може бути актуальне для відновлення автомобільних доріг особливо місцевого значення.

Перелік посилань

1. Gschösser F. Environmental Assessment of Road Constructions: Life Cycle Assessment of Swiss Road Pavements and an Accompanying Analysis of Construction and Maintenance Costs. ETH Zurich, 2011.
2. Huang Y, Bird RN, Heidrich O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. Resour Conserv Recycl 2007;52:58–73. doi:10.1016/j.resconrec.2007.02.002.
3. Roberts FL, Mohammad LN, Wang LB. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. J Mater Civ Eng 2002;14:279–93. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(279).

4. Skolnik J, Brooks M, Oman J. REPORT 744 Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction. 2013.
5. D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowser J, et al. Warm-Mix asphalt: European Practice. 2008.
6. Sullivan EJ, Moss A. Paving Cost Comparisons : Warm-Mix Asphalt Versus Concrete. PCA Mark Intell 2014.
7. Chappat M, Bilal J. The environmental road of the future: energy consumption and greenhouse gas emission. 2003.
8. Chehovits J, Galehouse L. Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements. First Int. Conf. Pavement Preserv., 2010, p. 27–42. doi:http://www.techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65_2010.pdf.
9. Pidwerbesky B, Beuysberg A, Bono J De. Low Emissions Asphalt – Experience to date. 13th Int'l Flex. Pavements Conf., 2009
10. Al Nageim H, Al-Busaltan SF, Atherton W, Sharples G. A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials. Constr Build Mater 2012; 36:743–8.
11. Cheng L. Developing Evaluation Method of Moisture Susceptibility for Cold Mix Asphalt. University of Wisconsin – Madison, 2013.
12. Khalid HA, Monney OK. Moisture damage potential of cold asphalt. Int J Pavement Eng 2009;
13. Olard F, Noan CL, Bedunean E, Romier A. Low energy asphalts for sustainable road construction. 4th Eurasphalt Eurobitume Congr., 2008, p. 21–3.
14. Partl MN. Sustainable development through asphalt recycling in Switzerland. Int. Work. ISAP Tech. Comm. APE Asph. Pavements Environ., 2010.
15. D. R. Salomon, Asphalt emulsion technology. Transportation Research Board, Washington, DC, 2006.
16. D. Swiertz, P. Johannes, L. Tashman, H. Bahia, Evaluation of laboratory coating and compaction procedures for cold mix asphalt, J Assoc Asph Paving Technol (2012).
17. S. Oruc, F. Celik, M. V. Akpınar, Effect of cement on emulsified asphalt mixtures, J Mater Eng Perform (2007) 16: 578–583.
18. A. W. Hefer, Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond, PhD Thesis, Texas A&M University, 2004.
19. X. Fang, F. Winnefeld, P. Lura, Precipitation of anionic emulsifier with ordinary Portland cement, J Colloid Interface Sci (2016).
20. X. Fang, A. Garcia, F. Winnefeld, M. N. Partl, P. Lura, Impact of rapidhardening cements on mechanical properties of cement bitumen emulsion asphalt, Mater Struct (2016) 49: 487-498.
21. S. F. Brown, D. Needham, A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures, Proc Association of Asphalt Paving Technologists, 2000, 1–22.
22. Bitumen Emulsion / under the coordination M. Cyna, M.-F. Ossola//RGRA, USIRF, Routes de France, SFERB. – Paris. – 2008. – ISBN 2-913414-49-4.
23. Advantages, peculiarities and mysteries of emulsion Cold mixes / J.-P. Serfass//RGRA. – 2002. – January. – № 802.

OVERVIEW OF TECHNOLOGIES FOR OBTAINING COLD EMULSION-MINERAL MIXTURES

Golovchenko Vasily S., is a graduate student of the Department of Transport Construction and Property Management of the National Transport University. E-mail: vasiagolovchenko05@gmail.com, phone +380997230304, <https://orcid.org/0000-0001-5078-8682>.

Abstract. The use of cold emulsion-mineral mixture (CBEM) instead of hot asphalt concrete mixture (HMA) has several advantages. Benefits include saving materials and reducing energy consumption, protecting the environment and reducing costs. Cold mixture obtained by mixing mineral aggregate with bitumen emulsion. Despite the efforts made over the last few decades to improve and develop CBEM, certain disadvantages remain that make it inferior to HMA, leading to the limitation or minimization of its use. However, the development of CBEM for road construction, reconstruction and maintenance is constantly gaining interest in both the industrial and research sectors of road construction.

Researchers in the field of road construction are constantly looking for ways to reduce energy consumption, greenhouse gas emissions and increase cost efficiency. Cold emulsion-mineral mixture is the result of research in this direction during the last few decades. CBEM is a mixture obtained by mixing bitumen emulsion, aggregates and filler at ambient temperature. Using CBEM, it is possible to achieve 95% energy savings compared to the production of HMA. The disadvantages of cold mixture are also obvious. Because the water must evaporate from the bitumen emulsion for the bitumen to adhere to the aggregates, the cold mix may take several weeks to reach its full strength. This can result in lower initial strength and high porosity compared to conventional hot mix asphalt. Also, because of the water in the mix, potential moisture damage and durability are concerns. As a result, CBEM was rarely used as a structural layer of the roof.

Key words: cold emulsion-mineral mixture, hot asphalt-concrete mixture, emulsion-mineral mixture.

References

1. Gschösser F. Environmental Assessment of Road Constructions: Life Cycle Assessment of Swiss Road Pavements and an Accompanying Analysis of Construction and Maintenance Costs. ETH Zurich, 2011. [in English].
2. Huang Y, Bird RN, Heidrich O. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resour Conserv Recycl* 2007;52:58–73. doi:10.1016/j.resconrec.2007.02.002. [in English].
3. Roberts FL, Mohammad LN, Wang LB. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *J Mater Civ Eng* 2002;14:279–93. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(279). [in English].
4. Skolnik J, Brooks M, Oman J. REPORT 744 Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction. 2013. [in English].
5. D'Angelo J, Harm E, Bartoszek J, Baumgardner G, Corrigan M, Cowser J, et al. Warm-Mix asphalt: european Practice. 2008. [in English].
6. Sullivan EJ, Moss A. Paving Cost Comparisons : Warm-Mix Asphalt Versus Concrete. *PCA Mark Intell* 2014. [in English].
7. Chappat M, Bilal J. The environmental road of the future: energy consumption and greenhouse gas emission. 2003. [in English].

8. Chehovits J, Galehouse L. Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements. First Int. Conf. Pavement Preserv., 2010, p. 27–42. doi:http://www.techtransfer.berkeley.edu/icpp/papers/65_2010.pdf. [in English].
9. Pidwerbesky B, Beuysen A, Bono J De. Low Emissions Asphalt – Experience to date. 13th Int'l Flex. Pavements Conf., 2009[in English].
10. Al Nageim H, Al-Busaltan SF, Atherton W, Sharples G. A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials. Constr Build Mater 2012; 36:743–8. [in English].
11. Cheng L. Developing Evaluation Method of Moisture Susceptibility for Cold Mix Asphalt. University of Wisconsin – Madison, 2013. [in English].
12. Khalid HA, Monney OK. Moisture damage potential of cold asphalt. Int J Pavement Eng 2009;
13. Olard F, Noan CL, Bedunean E, Romier A. Low energy asphalts for sustainable road construction. 4th Eurasphalt Eurobitume Congr., 2008, p. 21–3. [in English].
14. Partl MN. Sustainable development through asphalt recycling in Switzerland. Int. Work. ISAP Tech. Comm. APE Asph. Pavements Environ., 2010. [in English].
15. D. R. Salomon, Asphalt emulsion technology. Transportation Research Board, Washington, DC, 2006. [in English].
16. D. Swiertz, P. Johannes, L. Tashman, H. Bahia, Evaluation of laboratory coating and compaction procedures for cold mix asphalt, J Assoc Asph Paving Technol (2012). [in English].
17. S. Oruc, F. Celik, M. V. Akpınar, Effect of cement on emulsified asphalt mixtures, J Mater Eng Perform (2007) 16: 578–583. [in English].
18. A. W. Hefer, Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond, PhD Thesis, Texas A&M University, 2004. [in English].
19. X. Fang, F. Winnefeld, P. Lura, Precipitation of anionic emulsifier with ordinary Portland cement, J Colloid Interface Sci (2016). [in English].
20. X. Fang, A. Garcia, F. Winnefeld, M. N. Partl, P. Lura, Impact of rapidhardening cements on mechanical properties of cement bitumen emulsion asphalt, Mater Struct (2016) 49: 487-498. [in English].
21. S. F. Brown, D. Needham, A Study of Cement Modified Bitumen Emulsion Mixtures, Proc Association of Asphalt Paving Technologists, 2000, 1–22. [in English].
22. Bitumen Emulsion / under the coordination M. Cyna, M.-F. Ossola//RGRA, USIRF, Routes de France, SFERB. – Paris. – 2008. – ISBN 2-913414-49-4. [in English].
23. Advantages, peculiarities and mysteries of emulsion Cold mixes / J.-P. Serfass//RGRA. – 2002. – January. – № 802. [in English].

Дата надходження до редакції 05.11.2023.